



## ÇİMENTO BAZLI MALZEMELERİN KIRILMA TOKLUĞU PARAMETRELERİNİN HESABI İÇİN BİR METOT

Ragıp İnce, A. Tevfik Bildik

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ

### ABSTRACT

To analyze a concrete structure according to fracture mechanics, its fracture parameters are needed to be determined at first. Many non-linear fracture models have been proposed by design codes and investigators to determine fracture parameters of concrete. These models can be classified as the cohesive crack models and the effective crack models. Although the notched beam specimens have been commonly used in concrete fracture, cubical/cylindrical specimens have some advantages such as compactness and lightness. In this study, the wedge-splitting tests on cube specimens with different cement contents and water/cement ratios were performed for fracture models based on the effective crack model and the double-K model. In addition, the compressive strength values on cubes with 150 mm of these mixes were determined. Consequently, some relationships based on regression between the initial and the critical fracture toughness parameters and the strength properties and water/cement ratios of concrete were derived. The results of the split-cube tests look viable and very promising.

### ÖZET

Beton bir yapıyı kırılma mekaniğine göre analiz edebilmek için ilk önce kullanılan malzemenin kırılma parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Betonun kırılma parametrelerini belirlemek için şartnameler ve araştırmacılar tarafından birçok lineer olmayan kırılma mekaniği modelleri önerilmektedir. Bu modeller kohezif ve eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları olarak sınıflandırılmaktadır. Betonun kırılma mekaniğinde kırılgan numuneler yaygın olarak kullanılmakla birlikte, küp ve silindirik numuneler taşınabilirlik, hafiflik ve boyut etkisi çalışmalarında kolaylık sağlaması açısından bazı avantajlara sahiptir. Bu çalışmada farklı doz ve su/çimento oranları kullanılarak hazırlanan küp numuneler üzerinde kama-yarma deneyi yapılarak efektif çatlak ve çift-K kırılma modellerine göre betonun başlangıç ve kritik kırılma tokluk parametreleri tayin edilmiştir. Ayrıca aynı karışımlardan 150 mm. boyutunda küp numuneler üzerinde basınç deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak betonun kırılma tokluk parametreleri ile basınç mukavemeti ve su/çimento oranı arasında bazı regresyon bağıntıları türetilmiştir.

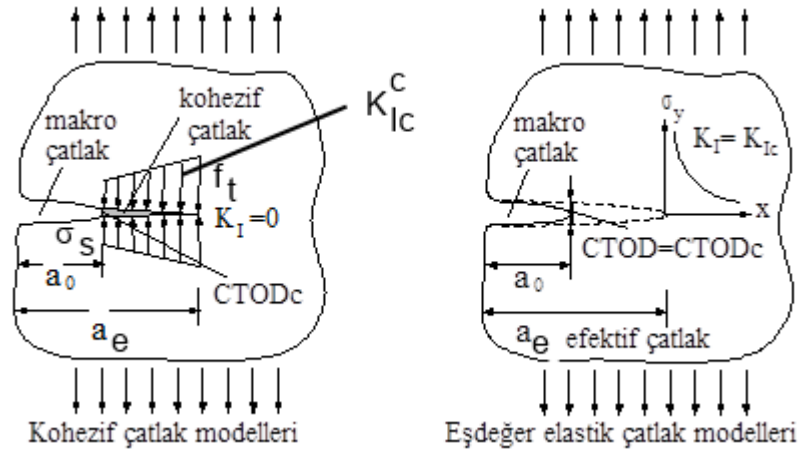
### GİRİŞ

Kırılma mekaniği temelde, malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yoğunluğunu arttıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. İlk olarak Griffith [1] tarafından temeli atılan Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) teorisi, 1960'lı yılların başında Kaplan [2] tarafından betona uygulanmıştır. Ancak daha sonra yapılan

deneyisel çalışmalar, LEKM kanunlarının beton için yetersiz olduğunu göstermiştir [3]. Bu amaçla birçok araştırmacı tarafından teknolojik ve nümerik alanlardaki gelişmelere paralel olarak, lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları geliştirilmiştir [4-9].

Bu yaklaşımlar temelde, çatlamış bir beton kesitte gerilme transferini mümkün kılan, kırılma süreci bölgesinin varlığını dikkate alırlar. Yapı şartnameleri ve LEKM tarafından ihmal edilen bu bölge, metallerde plastik bölgenin yanında çok küçük olmasına rağmen, betonda 100 mm'nin üzerinde değerler olarak büyük yer işgal eder [4]. Diğer taraftan bu bölgedeki gerilmeler, metallerdeki plastik bölgeden farklı olarak sabit kalmayıp azalmaktadır (Şekil 1). Bu davranışı karakterize etmek için LEKM'nin aksine lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları betonu modellemek için en az iki parametre kullanırlar.

Betonun kırılma modelleri kohezif çatlak modelleri (Fiktif Çatlak Modeli [4], Çatlak Bant Modeli [5]) ve eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları (İki Parametrelili Model [6], Efektif Çatlak Modeli [7], Boyut Etkisi Modeli [8] ve Çift-K Modeli [9]) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, kohezif çatlak yaklaşımları, kırılma süreci bölgesini çatlak ucunda azalan ve çatlığa basınç yapan bir gerilme bloğu ile modellerken, eşdeğer elastik çatlak yaklaşımları efektif bir çatlak uzunluğu kullanarak modellemektedir.



Şekil 1. Betonda kullanılan lineer olmayan modeller

Betonun kırılma mekaniğinde yaygın olarak kiriş numuneler kullanılmakla birlikte son zamanlarda taşınabilirlik ve hafiflik özelliklerinden dolayı küp ve silindir numunelerin kullanımı da artmıştır. Bu çalışmada, kama-yarma numuneleri üzerinden betonun başlangıç ve kritik kırılma tokluğu parametrelerini hesaplamak için, çimento bazlı malzemelerin kırılma mekaniğinde popüler iki metot olan efektif çatlak modeli ve çift-K modeli kombine edilmiştir. Bunun için farklı beton karışımlarından oluşan sekiz seri kama-yarma numuneleri üretilmiş ve elde edilen sertleşmiş beton deneyi sonuçlarına göre bazı ampirik formüller türetilmiştir.

### BETONUN KIRILMA MEKANİĞİNDE KAMA YARMA NUMUNELERİ

Beton bir yapıyı kırılma mekaniğine göre analiz edebilmek için ilk önce kullanılan malzemenin kırılma parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Betonun kırılma parametrelerinin tayininde yaygın olarak çentikli üç noktalı eğilme numuneleri kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebebi kirişlerin metallerde standart deney numunesi olarak yaygın kullanımındır. Bununla birlikte son zamanlarda yarma tipi numunelerin betonun kırılma malzeme parametrelerinin tayininde kullanılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır [10-13]. Betonun kırılma mekaniğinde, küp ve silindir numuneler üzerine yapılan deneyler: 1) Kama-Yarma ve 2) Yarmada-çekme olmak üzere iki kategoride incelenmektedir. Kama-Yarma deneyleri ilk

olarak kohezif çatlak modelleri için geliştirilmiş olmakla birlikte, efektif çatlak yaklaşımlarında uygulanması da mümkün olabilmektedir. Yarmada-çekme numuneleri ise, temelde betonun çekme dayanımının indirekt olarak tayininde kullanılmıştır. Bununla birlikte 20 yılı aşkın bir sürede yarmada-çekme numuneleri betonun kırılma mekaniğinde kullanılmaktadır [10-13].

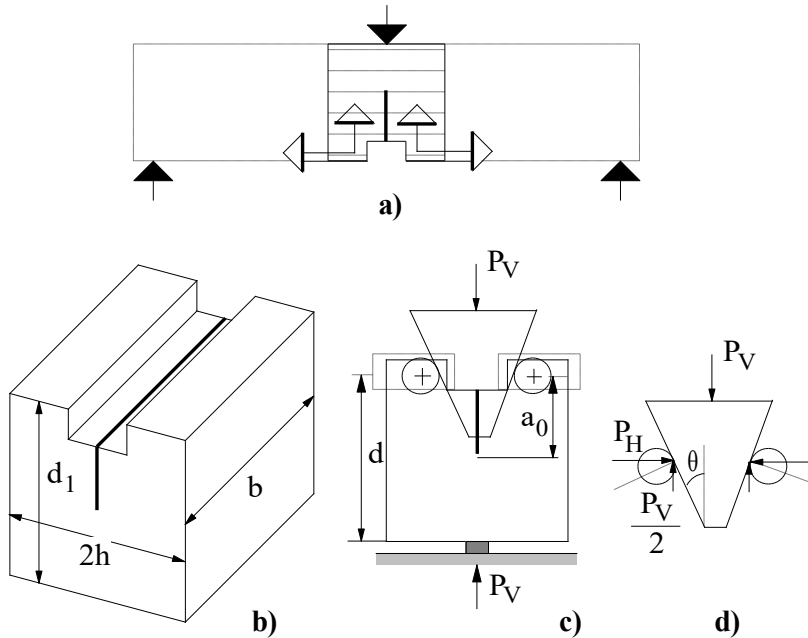
Kama-yarma numunelerinin ilk çıkış noktası metallerin kırılma parametrelerinin tayininde kullanılan standart kompakt-çekme numunesidir. Günümüzde betonun kırılma mekaniğinde çok popüler olan kama-yarma numuneleri Brühwiler ve Wittmann [10] tarafından Şekil 2'de detaylandırıldığı gibi üç noktalı eğilme numunelerinin kompakt şekli olarak geliştirilmiştir. Bu tip numunelerin lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) bağıntıları aşağıda tanımlandığı gibi kompakt çekme numuneleri ile aynı alınmaktadır.

Kama-yarma numunelerinde gerilme şiddet çarpanı aşağıda tanımlanan denklemle belirlenebilir [14]:

$$K_I = \frac{P_H}{b\sqrt{d}} \frac{(2 + \alpha)(0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)}{(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (1)$$

Burada Şekil 2 de belirtildiği gibi  $b$  numune genişliği,  $d$  numune boyutu ve  $\alpha=a/d$  relatif çatlak boyudur.  $P_H$  kamaya gelen yatay kuvvet bileşeni Şekil 2d den aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_H = \frac{1 - \mu \tan \theta}{2(\mu + \tan \theta)} P_V \approx \frac{P_V}{2 \tan \theta} \quad (2)$$



Şekil 2. Kama-yarma deneyi a) Kompakt bir kiriş numunesi olarak kama-yarma numunesi  
 b) Numune detayı c) Yükleme d) Kama kuvvetleri

Burada  $P_V$  numuneye uygulanan düşey yük,  $\mu$  rulman ile kama arasındaki sürtünme katsayısı ve  $\theta$  kama açısıdır.  $\theta=15^\circ$  için sürtünme etkileri ihmal edilebileceğinden yaklaşık ifade kullanılabilir. Kırılma parametrelerinin hesabında kullanılan diğer önemli büyüklük, çatlak

ağzı açılımı deplasmanı değeridir. Kama-yarma numuneleri için bu değer aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$CMOD = \frac{P}{bE'} \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right)^2 (2.163 + 12.219\alpha - 20.065\alpha^2 - 0.992\alpha^3 + 20.609\alpha^4 - 9.9314\alpha^5) \quad (3)$$

Burada  $E'$  malzemenin elastisite modülüdür. Diğer önemli LEKM bağıntısı çatlak ucu açılımı değeri kiriş numunelere benzer olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir [15].

$$\frac{COD(y)}{CMOD} = \sqrt{\left(1 - \frac{y}{a}\right)^2 + (1.081 - 1.149\alpha) \left[ \frac{y}{a} - \left(\frac{y}{a}\right)^2 \right]} \quad (4)$$

Burada  $y$  değeri, açılım değerinin hesaplandığı nokta ile numunenin geometrik merkezi arasındaki düşey mesafedir.

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Betonun kırılma mekaniği üzerine yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, basınç mukavemeti, su/çimento oranı, maksimum agrega çapı ve agrega tipinin kırılma parametreleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir [16-18]. Bu çalışmada 150 mm.'lik küplerden oluşturulan kama-yarma numuneleri farklı doz ve su/çimento oranlarında hazırlanan üç farklı çentik boyu için test edilmiştir. Her bir çentik boyundan iki numune olmak üzere her karışım için toplam altı adet çentikli numune üretilmiştir. Aynı zamanda özdeş mukavemet tayini için yine 150 mm.'lik küplerden basınç numuneleri dökülmüştür. Karışımlarda maksimum agrega çapı 16 mm olan nehir agregası kullanılmıştır. Numuneler bir gün kalıpta, ardından 28 gün suda bekletilmiş ve deney günü sudan çıkarılarak test edilmiştir. Küp numunelere ait malzeme özellikleri, çatlak geometrileri ve kırılma yükleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de  $s/\phi$  su/çimento oranı,  $f_c$  betonun silindir basınç mukavemeti,  $a_0$  başlangıç çentik boyu ve  $P_V$  numunelerin tepe basınç yüküdür. Şekil 2'deki karakteristik boyut tüm numunelerde  $d=140$  mm.'dir. Numuneler 100 kN kapasiteli hidrolik yük-kontrollü preste kırılmıştır. Numunelerin kırılma yüklerine 3 dk.  $\pm$  30 sn.'de erişilmiştir.

### SONUÇLARIN ANALİZİ

Deney sonuçları, betonun kırılma mekaniğinde popüler iki metot olan efektif çatlak [7] ve çift-K modellerine [9] göre analiz edilmiştir. Efektif Çatlak Modeli (EÇM), betonun kırılma parametrelerini hesaplamak için Şekil 3 te görüldüğü gibi çentikli üç noktalı eğilme numunelerinin yük-deplasman ( $P-\delta$ ) ilişkisini kullanmaktadır. Modelde, belirli bir  $a_0$  başlangıç çatlak uzunluğuna sahip numunenin maksimum yüküne karşılık gelen sekant modülü, farklı bir  $a_0$  başlangıç çatlak uzunluklu kirişin dinamik modülüne eşdeğer olduğu duruma karşılık gelen  $a_0$  başlangıç çatlak uzunluğu değeri efektif çatlak uzunluğu  $a_e$  (ki bu değer deneysel sonuçlardan biraz büyüktür) olarak kabul edilir. Sonuç olarak bu efektif çatlak uzunluğuna karşılık gelen kırılma tokluğunun kritik değeri  $K_{Ic}^e$  esas alınırsa modelin iki parametrelili olduğu ortaya çıkar. Bununla beraber bu yaklaşımda efektif çatlak boyu aşağıdaki ampirik formülle hesaplanabilir:

$$\alpha_e = \frac{a_e}{d} = \gamma_1 \left( \frac{\sigma_u}{E_c} \right)^{\gamma_2} \left( \frac{a_0}{d} \right)^{\gamma_3} \left( 1 + \frac{g}{d} \right)^{\gamma_4} \quad (5)$$

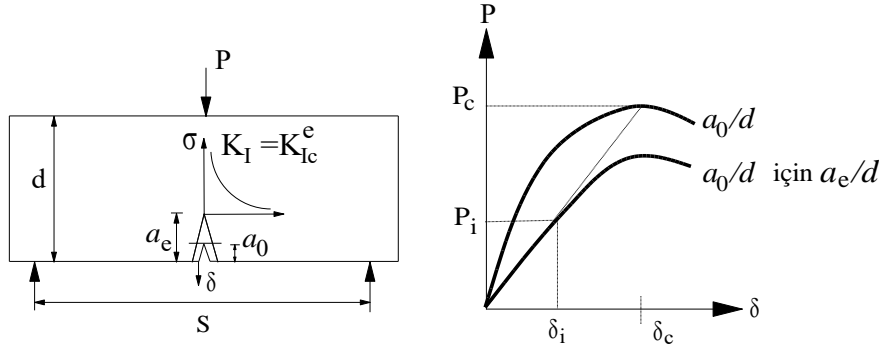
Burada  $g$  maksimum agrega çapı,  $\gamma_1 = 0.088$ ,  $\gamma_2 = -0.208$ ,  $\gamma_3 = 0.451$ ,  $\gamma_4 = 1.653$  ve  $\sigma_u$  nominal dayanım Şekil 2 den klasik mukavemet yaklaşımı ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir [19]:

$$\sigma_u = \frac{P_H}{bd} + \frac{6P_H d/2}{bd^2} = \frac{4P_H}{bd} \quad (6)$$

Betonun elastisite modülü [MPa], ACI-318 [20] den aşağıda verilen şekliyle hesaplanmıştır.

$$E_c = 4730 \sqrt{f_c} \quad (7)$$

Sonuç olarak İfade (5) ten elde edilen çatlak boyu İfade (1) de yerine konularak kritik kırılma tokluğu hesaplanabilir.



Şekil 3. Efektif çatlak modelinin geometrik yorumu

Çizelge 1. Numunelerin malzeme özellikleri, kırılma yükleri ve kırılma parametreleri

Seri- çökme	Dozaj kg/m <sup>3</sup>	s/ç	$f_c$ MPa	$a_0$ mm	$P_v$ kN	$a_e/d$	$K_{Ic}^e$ MPa√m	$CTOD_c$ mm	$K_{Ic}^{ini}$ MPa√m
A-12	250	0.81	19.24	50	2.59	0.523	0.883	0.0293	0.473
				50	2.71	0.520	0.914	0.0300	0.509
				80	1.23	0.695	0.843	0.0234	0.482
				80	1.21	0.696	0.836	0.0234	0.472
				95	0.71	0.799	0.948	0.0267	0.596
				95	0.70	0.800	0.945	0.0269	0.592
B-6	250	0.76	22.45	50	2.78	0.524	0.949	0.0292	0.505
				50	2.93	0.520	0.988	0.0300	0.551
				80	1.42	0.689	0.944	0.0235	0.563
				80	1.36	0.692	0.922	0.0234	0.535
				95	0.89	0.783	1.056	0.0249	0.699
				95	0.87	0.786	1.051	0.0251	0.689
C-12	330	0.58	35.56	50	3.37	0.527	1.160	0.0286	0.596
				50	3.65	0.521	1.234	0.0298	0.682
				80	1.68	0.694	1.149	0.0234	0.658
				80	1.68	0.694	1.149	0.0234	0.658
				95	1.01	0.794	1.299	0.0261	0.829
				95	0.90	0.806	1.275	0.0277	0.784
D-6	325	0.56	36.97	50	3.45	0.526	1.186	0.0287	0.612
				50	3.35	0.528	1.159	0.0282	0.581
				80	1.72	0.694	1.174	0.0234	0.675

				80	1.71	0.694	1.171	0.0234	0.670
				95	0.97	0.800	1.311	0.0269	0.820
				95	0.78	0.823	1.281	0.0305	0.754
E-12	410	0.54	44.07	50	3.71	0.527	1.280	0.0285	0.651
				50	3.71	0.527	1.280	0.0285	0.651
				80	1.78	0.699	1.247	0.0234	0.690
				80	1.63	0.707	1.193	0.0233	0.619
				95	0.96	0.811	1.412	0.0284	0.857
				95	0.97	0.809	1.413	0.0282	0.861
F-6	400	0.53	46.63	50	3.60	0.531	1.258	0.0276	0.601
				50	3.64	0.531	1.269	0.0278	0.614
				80	1.82	0.699	1.279	0.0234	0.705
				80	1.83	0.699	1.282	0.0234	0.710
				95	1.00	0.809	1.454	0.0282	0.886
				95	0.99	0.810	1.452	0.0284	0.883
G-12	490	0.45	51.35	50	3.99	0.528	1.378	0.0284	0.698
				50	4.18	0.524	1.428	0.0291	0.757
				80	1.86	0.702	1.324	0.0234	0.716
				80	1.78	0.706	1.295	0.0233	0.678
				95	1.03	0.811	1.523	0.0285	0.923
				95	0.95	0.820	1.513	0.0299	0.897
H-6	480	0.44	54.07	50	3.87	0.531	1.353	0.0276	0.646
				50	4.11	0.527	1.418	0.0285	0.721
				80	1.79	0.708	1.316	0.0233	0.678
				80	1.93	0.701	1.366	0.0234	0.745
				95	1.06	0.811	1.563	0.0285	0.948
				95	0.95	0.823	1.550	0.0304	0.914

Lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımları içerisinde, Çift-K Modeli [9], beton bir yapıda, gerilme şiddet çarpımı  $K_I$ ,  $K_{Ic}^{ini}$  değerine eriştiğinde çatlağın yayılmaya başladığını (başlangıç kırılma tokluğu) ve kritik kırılma tokluğu  $K_{Ic}^{un}$  değerine eriştiğinde ise çatlağın ani yayıldığını kabul etmektedir.  $K_{Ic}^{un}$  kırılma parametresi efektif çatlak modele [7] benzer olarak komplians yönteminden hesaplanmaktadır. Komplians yönteminde kırılma parametreleri, çentikli kompakt çekme numunesinin Yük-Çatlak Ağzı Açılımı (P-CMOD) ilişkisinden faydalanarak hesaplanabilir. Yapılan deneysel çalışmalar  $K_{Ic}^{un}$  ve  $K_{Ic}^e$  tokluklarının özdeş olduğunu göstermektedir [21].

$K_{Ic}^{ini}$  hesaplamak için ilk önce Şekil 1.'de detaylandırıldığı gibi, çatlak gerisinde yer alan kohezif gerilmelerin sebep olduğu kohezif tokluğunun  $K_{Ic}^c$  hesaplanması gerekir. Bu değer pratik olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir [9]:

$$K_{Ic}^c = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} [2f_t + \sigma_s (CTOD_c)] \sqrt{a_e - a_0} \quad (8)$$

Bu çalışmada betonun çekme mukavemeti  $f_t$  için ACI-318 [20] de verilen aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$f_t = 0.4983\sqrt{f_c} \quad (9)$$

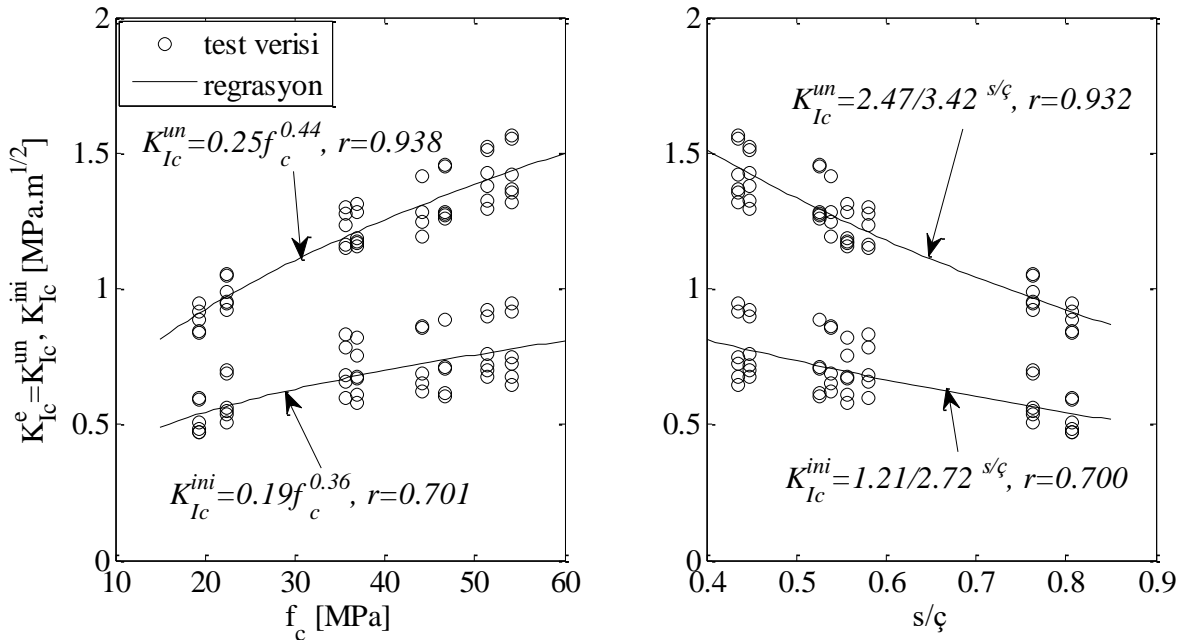
Burada  $f_c$  ve  $f_t$  [MPa] birimindedir. Yapılan hesaplamalarda  $\sigma_s$  değeri için bu çalışmada Stang [22] tarafından normal ve yüksek mukavemetli betonlar için önerilen aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\sigma_s(CTOD_c) = \frac{f_t}{1 + (CTOD_c/0.015)^{1.2}} \quad (10)$$

Sonuç olarak başlangıç gerilme şiddet çarpanı süperpozisyon kaidesi gereğince İfade (11)'den hesaplanabilir:

$$K_{Ic}^{ini} = K_{Ic}^{un} - K_{Ic}^c \quad (11)$$

Efektif çatlak modeli ve Çift-K modeli yaklaşımlarına göre elde edilen kırılma tokluğu değerleri toplu olarak Çizelge 1'de verilmiştir. Şekil 4'de kırılma tokluk parametreleri ( $K_{Ic}^e = K_{Ic}^{un}, K_{Ic}^{ini}$ ) ile betonun iki önemli malzeme parametresi ( $f_c$  ve  $s/\zeta$ ) arasında regresyon tabanlı ilişkiler verilmiştir. Buna benzer bir çalışma yüksek mukavemetli betonlar için sadece basınç mukavemeti dikkate alınarak John ve Shah [23] tarafından kritik kırılma tokluk değeri için yapılmıştır. Şekil 4 deki kırılma tokluğu ve su/çimento arasındaki ilişkiler Abrams Kanunu [24] tabanlıdır. Bu kanun basınç mukavemeti-su/çimento arasındaki ilişkiyi tanımlamakla birlikte aynı ilişkinin kırılma tokluğu değeri için de geçerli olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Betonun kırılma parametreleri ile malzeme özellikleri arasındaki ilişki

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan çalışmada kama-yarma deneyi kullanılarak eşdeğer elastik çatlak yaklaşımlarına göre betonun kırılma toklukları tayin edilmiş ve taze ve sertleşmiş beton özelliği olan su/çimento oranı ve basınç mukavemeti arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- 1) Çentikli küp numuneler üzerine yapılan kama-yarma deneyi, kırış numunelere nazaran daha kompakt ve hafif olduğundan deneyleri gerçekleştirmek daha kolay olmaktadır. Bu durum özellikle boyut etkisi çalışmalarında ön plana çıkmaktadır.
- 2) Şekil 6'da görüldüğü gibi  $K_{lc}^e = K_{lc}^{un}$  ile mekanik mukavemet arasında yüksek korelasyon görülmekle birlikte,  $K_{lc}^{ini}$  için iyi korelasyon görülmektedir. Bu durumun  $K_{lc}^{ini}$  nin hesabında kullanılan  $CTOD_c$  parametresinin ölçüm hassaslığına aşırı miktarda bağlı olduğundan kaynaklandığı söylenebilir.
- 3) Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, Abrams kanununun basınç mukavemeti-su/çimento arasındaki ilişkiyi tanımlamakla birlikte aynı ilişkinin kırılma tokluğu değeri için de geçerli olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] A.A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A221 (1920) 163-198.
- [2] M.F. Kaplan, Crack propagation and the fracture of concrete, *Journal of ACI*, 58 (1961) 591-610.
- [3] C.E. Kesler, D.J. Naus, J.L. Lott, Fracture mechanics its applicability to concrete, *The Society of Material Science*, 4 (1971) 113-124.
- [4] A. Hillerborg, M. Modeer, P.E. Petersson, Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6 (1976) 773-782.
- [5] Z.P. Bazant, B.H. Oh, Crack band theory for fracture concrete, *Materials and Structures (RILEM)*, 16 (93) (1983) 155-157.
- [6] Y.S. Jenq, S.P. Shah, A two-parameter model for concrete, *Journal of Engineering Mechanics- ASCE*, 111 (1985) 1227-1241.
- [7] P. Nallathambi, B.L. Karihaloo, Determination of the specimen size independent fracture toughness of plain concrete, *Magazine of Concrete Research*, 38 (1986) 67-76.
- [8] Z.P. Bazant, M.T. Kazemi, Determination of fracture energy, process zone length, and brittleness number from size effect with application to rock and concrete, *International Journal of Fracture*, 44 (2) (1990) 111-131.
- [9] S. Xu, H.W. Reinhardt, Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation, *International Journal of Fracture*, 98 (1999) 111-149.
- [10] E. Brühwiler, F.H. Wittmann, The wedge splitting test, a method of performing stable fracture tests, *Engineering Fracture Mechanics*, 35 (1990) 117-126.
- [11] R. Ince, Determination of concrete fracture parameters based on two-parameter and size effect models using split-tension cubes. *Engineering Fracture Mechanics* 77 (2010) 2233-2250.
- [12] R. Ince, Determination of concrete fracture parameters based on peak-load method with diagonal split-tension cubes, *Engineering Fracture Mechanics*, 82 (2012) 100-



- 114.
- [13] R. Ince, Determination of the Fracture Parameters of the Double-K Model Using Weight Functions of Split-Tension Specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, 96 (2012) 416-432.
- [14] H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin. *Stress analysis of cracks handbook*. ASME Press, New York, 2000.
- [15] S. Yang, T. Tang, D.G. Zollinger, A. Gurjar, Splitting tension tests to determine concrete fracture parameters by peak-load method. *Advanced Cement Based Materials* 1997; 5:18-28.
- [16] Z.P. Bazant, E. Becq-Giraudon, Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002) 529-556.
- [17] R. Ince, Prediction of fracture parameters of concrete by artificial neural networks. *Engineering Fracture Mechanics*, 71 (2004) 2143-2159.
- [18] R. Ince, Artificial Neural Network-Based Analysis of Effective Crack Model in Concrete Fracture. *Fatigue and Frac of Engng Mater and Struct*, 33(9) (2010) 595-606.
- [19] A.T. Bildik, R. Ince, Determination of fracture parameters of effective crack model by wedge-splitting test, *International Conference on Advances and Innovations in Engineering*, Elazığ, Turkey, 2017.
- [20] ACI-318. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*. Detroit, 1989.
- [21] R. Ince, C. Fenerli, Determination of initial fracture toughness parameter of the double-k model by artificial neural networks, *12<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul, Turkey, 2016.
- [22] H. Stang, Evaluation of Properties of Cementitious Fiber Composite Materials, *International RILEM/ACI Workshop, High Performance Fiber Cement Composites* (Ed. Reinhardt H. W. and Naaman A. E.), 388-406, 1992.
- [23] Y.S. John, S.P. Shah, Fracture mechanics analysis of high strength concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(4) (1989) 185-98.
- [24] D.A. Abrams, Design of concrete mixtures, *Lewis Institute Bulletin* 1 (1918).